



核融合炉用超臨界圧ヘリウム強制冷却型長尺超電導 導体の安定性に関する研究

著者	多田 栄介
号	976
発行年	1987
URL	http://hdl.handle.net/10097/11925

氏 名	多 田 栄 介
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭 和 63 年 3 月 11 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 53 年 3 月 群馬大学大学院工学研究科機械工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	核融合炉用超臨界圧ヘリウム強制冷却型長尺超電導導 体の安定性に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 穴山 武 東北大学教授 村上 孝一 東北大学教授 脇山 徳雄 東北大学教授 武山 斌郎 東北大学助教授 鈴木 光政

論 文 内 容 要 旨

本研究は、磁場閉じ込め方式トカマク型核融合炉（以下、核融合炉と称する）に使用する超臨界圧ヘリウム強制冷却型超電導コイルの設計基準の確立を計るために実施した長尺で実規模な cable-in-conduit 型超電導導体の安定性特性、圧力損失特性及び圧力上昇特性に関する実験結果とその定量的評価についてまとめたものであり、各章の要旨は以下の通りである。

第 1 章 序 論

核融合炉用超電導コイルは、大型化、大電流化及び高磁界化が必須であり、コイル設計に際しては、大電磁力に対して十分な機械的強度を有し、パルス運転のために高い電気絶縁強度を有することが最も重要となる。また、核融合環境下で予想される外乱に対する安定性も要求される。このような機械的及び電気的特性を満足するためには、冷却方式として超臨界圧ヘリウムによる強制冷却方式の採用が不可欠であると考えられている。しかし、強制冷却方式の場合、冷媒が閉空間的流路に配置され顕熱のみによる冷却となるので、外乱に対する冷媒の温度及び圧力が上昇し易く、安定性特性、圧力損失特性、及び圧力上昇特性等の定量的評価を踏まえた設計基準の確立が急務となっている。

本研究は、上記設計基準の確立を計るために、日本での次期装置として位置付けられている核融合実験炉（FER）用導体と同等諸元を有する長尺な超臨界圧ヘリウム強制冷却型超電導導体の安定

性特性を始めとするこれら諸特性についての実験結果及び理論解析との比較検討に関するもので、実規模長尺導体を核融合炉と同様に真空中に配置し、核融合炉における局所の高レベル外乱を模擬する誘導加熱ヒータを採用する等、より実際の核融合環境に即した動作条件で諸特性の評価を行ったことが特徴である。

第 2 章 超電導コイルの安定性

超電導コイルの安定性は、導体に加わる外乱及び外乱によって誘因される導体のジュール発熱と導体の周囲に配置される冷媒の冷却能力とのエネルギーバランスによって定まり、超電導コイルが安定に動作するためには、使用条件下において予想される外乱及びジュール発熱より充分大きな冷却能力を有することが必要となる。プール冷却型コイルの場合、液体ヘリウムの蒸発潜熱を利用した沸騰熱伝達により大きな冷却能力が期待できるため、冷却能力が導体の定常的なジュール発熱を上回る設計が可能であり、コイルは、外乱量に無関係に安定となる完全安定性を有することができる。一方、超臨界圧ヘリウムによる強制冷却型コイルの場合、顕熱による冷却となり外乱に対して冷媒の温度及び圧力が容易に変化するので導体の定常的なジュール発熱に対して安定化を計ることが困難であり、超電導状態に回復可能な最大許容外乱量（安定性マージン）を対象とした安定性設計となる。この安定性マージンは、冷媒の流れの場の変化を加味して解析的に求めることが必要となる。核融合炉においては、導体の局所的動きの様に時定数が数msecで外乱量が数百mJとなる高レベル外乱と核発熱の様に時定数が数十msec以上となる低レベル外乱という二種類が作用すると考えられており、導体と冷媒間の熱伝達として、外乱の時定数に応じて夫々過渡及び定常熱伝達特性を考慮する必要がある。

第 3 章 実験装置及び実験方法

本研究で試験を行った超電導導体は、定格電流 15 kA で核融合実験炉用導体と同等諸元を有する cable-in-conduit 型で、直径 1.18 mm の超電導ストランドが 189 本縦横 22.6 mm の CuNi 製コンジット内に配置されている。本導体を直径 2.4 m で 4 ターン巻いて総長 32 m の試験ループとして計測用電圧タップ、温度素子及び圧力タップを取り付けた後、最大 60 g/s の超臨界圧ヘリウムを供給できる強制冷凍試験装置に組み込み各種実験を実施した。安定性実験では、核融合炉における高レベル外乱を想定して、誘導加熱ヒータを用いて 18 cm の領域の導体を 700 Hz、6 msec の条件で加熱し、冷媒の流量、圧力及び温度をパラメータとして各通電電流値毎に安定性マージンを測定した。圧力上昇実験においては、導体の臨界電流値以上の電流を通電することによって導体全域にわたってジュール発熱させた最悪のコイル異常の条件において導体内圧力変化を測定した。

第 4 章 圧力損失及び圧力上昇に関する実験結果と検討

(1) 圧力損失特性

本研究では、流路諸元の異なる数種の cable-in-conduit 型導体の圧力損失特性の測定を実施したが、従来の等価直径及び冷却ペリメータに基づく圧力損失係数及びレイノルズ数という無次元数

によって本導体の圧力損失特性の定量的評価が可能であることが明らかとなった。また、cable-in-conduit型導体の圧力損失係数は、一般の円管内流れとは異なり 10^2 の低レイノルズ数から 10^4 の高レイノルズ数の全域にわたって連続的であること、更に、乱流の速度分布から求めたNikuradseの式に基づく下式と一致することが明らかとなった。

$$f^{-1/2} = 0.87 \ln(\text{Re} f^{1/2}) - 2.4 \quad (1)$$

上式は、非常に粗い内壁を有する円管内流れに相当し、cable-in-conduit型導体の圧力損失は、通常の滑らかな円管の場合よりも約2倍程度大きいことが明らかとなった。以上の結果から、cable-in-conduit型導体では、多数本撚り合わせた超電導ストランドの影響により低レイノルズ数領域から乱流の速度分布をもった流れが支配的であると考えられる。

(2) 圧力損失に伴う温度上昇

強制冷却型超電導コイルの圧力損失特性は、冷媒循環のためのポンプ損失への影響ばかりでなく圧力損失に伴う導体長手方向の温度上昇が安定性特性に悪影響を及ぼすという観点からも重要である。本研究において、この温度上昇特性を明らかにするため冷媒流量をパラメータとして導体出入口の温度変化を測定した結果、初期圧力6 atmの方が、12 atmの場合よりも出入口温度差が少ないこと、また、流量を10 g/s（圧力損失として1.0 atmに相当）以上に増加しても圧力損失による温度上昇が大きくなるため導体の動作温度を下げる効果が少ないことが明らかとなった。これらの特性は、超臨界圧ヘリウムのエンタルピと圧力の非直線性と定性的に一致し、強制冷却型超電導コイルの圧力損失は、1 atm以下が適していることが明らかとなった。

(3) 圧力上昇特性

強制冷却型導体は、閉空間的流路構造で導体内のヘリウム保有量が少ないためにコイル異常時に容易に圧力上昇を招き易く、圧力上昇特性を把握することは導体の機械的設計上重要である。本研究では、最悪のコイル異常に相当する導体全域がジュール発熱した場合の導体内圧力変化を測定した。この結果、圧力上昇は、ヘリウムへの入熱密度にはほぼ比例すること、また、安定性理論解析コードALPHE-IIを用いて同一境界条件で計算した結果と測定値はよく一致し、定量的評価が可能であることが明らかとなった。

第5章 安定性に関する実験結果と検討

強制冷却型導体の安定性に関しては、従来、加熱部（外乱部）導体を対象に議論されてきたが、実規模で長尺な超電導導体を用いて核融合における局所的高レベル外乱を想定した加熱を行った本研究により、加熱部で温度上昇したヘリウムが初期流速に従って下流側に流れ込むために下流側導体の不安定性を引き起こすこと、また、下流側導体の安定性マージンは、加熱部導体の場合よりも低い結果となり、特に、大型超電導コイルにとって非常に重要であることが明らかとなった。

(1) 加熱部導体の安定性

核融合炉における高レベル外乱を想定して、導体の一部分を周波数700 Hzで6 msecの加熱を行った本研究により、加熱部では、定常強制対流熱伝達よりも数倍大きな過渡熱伝達で導体とヘリウ

ムの熱交換が支配されており、過渡熱伝達は、境界層の拡散機構より導かれた下式とよく一致することが明らかとなった。

$$\alpha = (\pi \lambda_h \rho_h C_p / t)^{1/2} \quad (2)$$

また、加熱部導体の安定性マージンは、加熱部領域に存在するヘリウムの冷却能力よりも約2倍大きく、加熱部においては、局所的な圧力変化に基づいた誘導流れが発生し、この流れに従って加熱部領域以外のヘリウムが加熱部導体に供給され、冷却を促進していることが明らかとなった。この様に、加熱部導体は、過渡熱伝達及び誘導流れにより冷却が促進される結果、定常流が支配的である下流側導体よりも高い安定性マージンを有するものと考えられる。

(2) 下流側導体の安定性

加熱部下流側導体の不安定性は、加熱部で平衡温度まで温度上昇したヘリウムが初期流速に比例した速度で下流側に流れ込むために生じ、下流側での流れの場合は定常流れが支配的であること、また、下流側導体の安定性マージンは、冷媒の流量、圧力及び温度依存性を顕著に示すことが明らかとなった。この圧力及び温度依存性は、超臨界圧ヘリウムのエンタルピの圧力及び温度特性と定性的に一致しており、圧力が低い程高い安定性マージンとなることが明らかとなった。また、流量依存性は、導体長手方向の冷却能力が初期流量に比例するために生じ、安定性マージンは、流量の0.4乗に比例して大きくなることが明らかとなった。

第6章 安定性特性の理論解析

局所的な高レベル外乱を受けたcable-in-conduit型導体の安定性は、加熱部及び下流側導体での安定性に大別され、前者は、過渡の流れ及び後者は定常流れによって支配される。このため、加熱部導体の安定性の評価は、冷媒の流れの場の変化を加味することが必要であり、独自に開発した理論解析コードALPHE-IIを用いて測定値との比較検討を実施した。この結果、計算値と測定値はよく一致し、ALPHE-IIによって定量的評価が可能であることが明らかとなった。また、加熱部下流側導体の安定性については、定常流れが支配的であるので下式に示す準静的過程に基づくエネルギーバランスによって評価した。

$$\rho_w A_w \Delta x \int C_w dT + A_h \Delta x \int \rho_h C_p dT = Q_h \Delta t_h + (Q_j - Q_c - Q_f) \Delta x / v_f \quad (3)$$

上式のエネルギーバランスによる計算結果は、下流側導体安定性特性測定結果を安全側に評価するが傾向はよく一致し、本研究で示した準静的過程に基づいた定量的評価が可能であることが明らかとなった。

第7章 結 論

以上の様に、核融合実験炉用超電導コイルを想定した本研究における超電導試験ループの一連の

実験によって、超臨界圧ヘリウムを冷媒として用いた実規模で長尺な cable-in-conduit 型導体の圧力損失特性、圧力上昇特性及び安定性特性等コイル設計に不可欠な諸特性を解明すると同時にこれらの定量的評価を達成することができた。

審 査 結 果 の 要 旨

超臨界圧ヘリウムによる強制冷却方式の超電導コイルは、液体ヘリウムによる浸漬冷却方式のものに比べ、機械的強度や電気絶縁特性が優れていることから、大容量・高磁界でパルス運転を必要とするトカマク型核融合炉用として特に注目され開発が進められている。本論文は、核融合実験炉用コイルの設計基準の確立を図るために試作された長尺の強制冷却型超電導導体について、熱的外乱を加えた場合の超臨界圧ヘリウムの圧力損失や圧力上昇、超電導状態に回復可能な最大許容外乱量（安定性マージン）の検討等、安定性評価の基礎となる諸特性を総合的に検討した結果をとりまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、超電導コイルの安定性について論じ、浸漬冷却方式と強制冷却方式の安定性についての比較検討から、強制冷却方式では外乱による発熱量と冷媒の冷却能力との大小関係に加えて、冷媒の流れの場の変化を考慮する必要があることを述べ、安定性マージンを解析的に求めるための手法を示している。

第3章では、強制冷却型超電導導体の諸特性を定量的に評価するための実験方法について述べている。本研究では、定格電流15kA、長さ32mのcable-in-conduit型導体を用いて4ターンの試験ループをつくり、誘導加熱ヒーターにより高レベル外乱を模擬し、圧力損失特性の測定や安定性実験を行っている。

第4章では、強制冷却型導体の初期冷却特性、圧力損失特性及び圧力上昇特性等についての測定結果を示し、cable-in-conduit型導体内の流れは粗い内壁を有する円管内流れに相当し、滑らかな円管の場合より約2倍程度圧力損失が大きいことなど、興味ある性質を明らかにしている。

第5章では、安定性についての実験結果を述べ、高レベル外乱を局所的に加えた場合の安定性挙動が4つのパターンに分類され、不安定性が加熱部の他に下流部導体にも現われること、下流側導体の安定性マージンが加熱部導体より小さいことなど、コイル設計上重要な性質を明らかにしている。これらは、はじめて得られた重要な成果である。

第6章では、加熱部及び下流部導体の安定性についての理論解析による検討結果を述べ、加熱部導体では過渡熱伝達を考慮することにより、下流部導体では準静的エネルギー保存式によって、安定性マージンを定量的に評価し得ることを示している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、核融合実験炉を想定して製作した強制冷却型超電導導体について、超臨界圧ヘリウムの圧力損失特性や安定性特性等、コイル設計に必要な諸特性を理論と実験の両面から解明したもので、超電導工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。